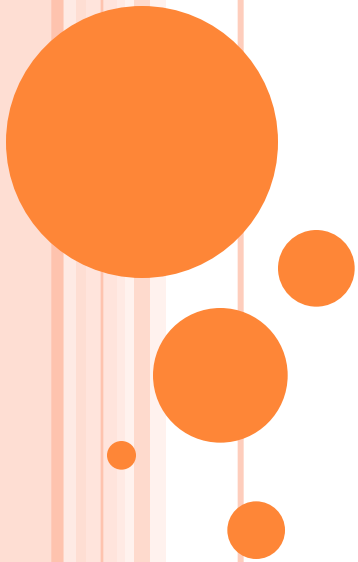


ЛЕКЦИЯ 4

МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ, ОСНОВЫ БИОРЕОЛОГИИ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГЕМОДИНАМИКИ



- I. Идеальная и реальная жидкости
- II. Ньютоновские и неньютоновские жидкости
- III. Течение вязкой жидкости по трубам
- IV. Предмет реологии, биореология.
- V. Течение реальной жидкости, как деформация сдвига
- VI. Свойства крови, как вязкоупругой жидкости
- VII. Физические основы гемодинамики

Идеальная жидкость -
это абсолютно несжимаемая и невязкая
жидкость.

Уравнение Бернулли:

$$\boxed{P} + \boxed{\rho g h} + \boxed{\frac{\rho V^2}{2}} = \text{const}$$

Статическое Гидростатическое Динамическое

P – давление в некоторой точке жидкости;
 h – высота этой точки, отсчитываемая от определенного уровня;
 V – скорость жидкости в этой точке;
 g – ускорение свободного падения;
 ρ – плотность жидкости.

Реальная жидкость – это вязкая жидкость, при течении которой скорость ее движения в различных точках сечения потока (струи) различна.

Вязкость – физическое явление существования сил вязкого трения при течении реальной жидкости.

Уравнение неразрывности струи:

$$Q = SV = \text{const}$$

Q – объемная скорость тока жидкости $[Q] = \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$;

S – площадь поперечного сечения струи;

V – усредненная по сечению скорость течения жидкости.

Виды течений:

Ламинарное

Слои жидкости скользят друг относительно друга, сохраняя свою целостность и не перемешиваясь (если пренебречь диффузией).

Турбулентное

На границах слоев создаются вихри, вызывающие нарушение целостности слоев и их активное перемешивание.

Формула Ньютона для силы вязкого трения:

$$F = \eta \frac{dV}{dz} S$$

F – сила вязкого трения между соседними слоями текущей жидкости;

V – скорость движения слоя жидкости;

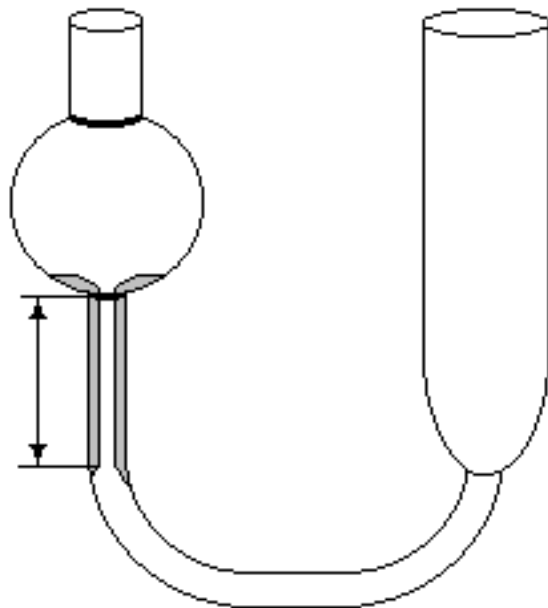
z – координата, которая отсчитывается в направлении, перпендикулярном к границе соприкосновения слоев;

$\frac{dV}{dz}$ – модуль градиента скорости;

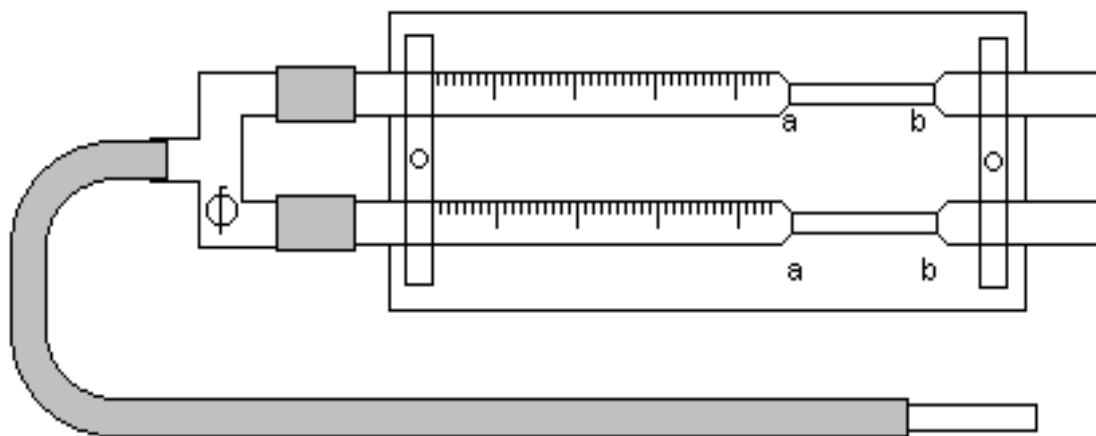
S – площадь поверхности соприкосновения трущихся слоев жидкости;

η - коэффициент вязкости (динамическая вязкость) жидкости, $[\eta]=\text{Па}\cdot\text{с}$.

Вискозиметрия – измерение вязкости жидкости.
Приборы для ее измерения **вискозиметры**.



Вискозиметр
Оствальда



Вискозиметр
Гесса

РЕАЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ:

Ньютоновские

Коэффициент вязкости зависит только от рода жидкости и от ее температуры. С ростом температуры коэффициент вязкости уменьшается.
(Вода, масло)

Неньютоновские

Величина коэффициента вязкости зависит также от величины, характеризующих условия течения жидкости, например, градиента скорости.
Кровь, растворы макромолекул.

Охарактеризовать способность переходить от ламинарного течения к турбулентному и наоборот, можно при помощи

числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho V D}{\eta}$$

ρ – плотность жидкости

V – усредненная по сечению скорость течения жидкости

D – диаметр трубы

η – коэффициент вязкости

$$\text{Если } \nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ то } Re = \frac{VD}{\nu}$$

ν - кинематическая вязкость

$Re < Re_{кр}$ – ламинарное течение

$Re > Re_{кр}$ – турбулентное течение

В случае ньютоновских жидкостей зависимость скорости слоя жидкости V от расстояния до центра трубы r для участка цилиндрической трубы длиной L и радиусом R имеет вид:

$$V = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} \cdot (R^2 - r^2)$$

P_1 – давление в начале участка трубы

P_2 – давление в конце участка трубы

Наибольшей скоростью обладают частицы, движущиеся вдоль оси трубы при этом:

$$V_{max} = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} \cdot R^2$$

Формула Пуазейля

$$Q = \frac{(P_1 - P_2) \cdot \pi R^4}{8\eta L}$$

Q – объем жидкости, протекающей через поперечное сечение цилиндрической трубы за единицу времени при стационарном ламинарном течении

P_1 – давление в начале участка трубы

P_2 – давление в конце участка трубы

R – радиус цилиндрической трубы

L – длина цилиндрической трубы

АНАЛОГИИ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ

Протекание жидкости в трубе

Q – объем жидкости

$P_1 - P_2$ – разность давлений

$$X = \frac{P_1 - P_2}{Q} = \frac{8\eta L}{\pi R^4} -$$

гидравлическое сопротивление

Последовательное соединение труб

$$X_{\text{общ}} = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

Параллельное соединение труб

$$\frac{1}{X_{\text{общ}}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}$$

Протекание электрического тока в проводнике

I – сила тока

$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов

$$R = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{I} - \text{электрическое сопротивление}$$

Реология – это область физики, изучающая процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением различных вязких и пластических материалов.

Механическое напряжение

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}_{\text{вн}}}{S}$$

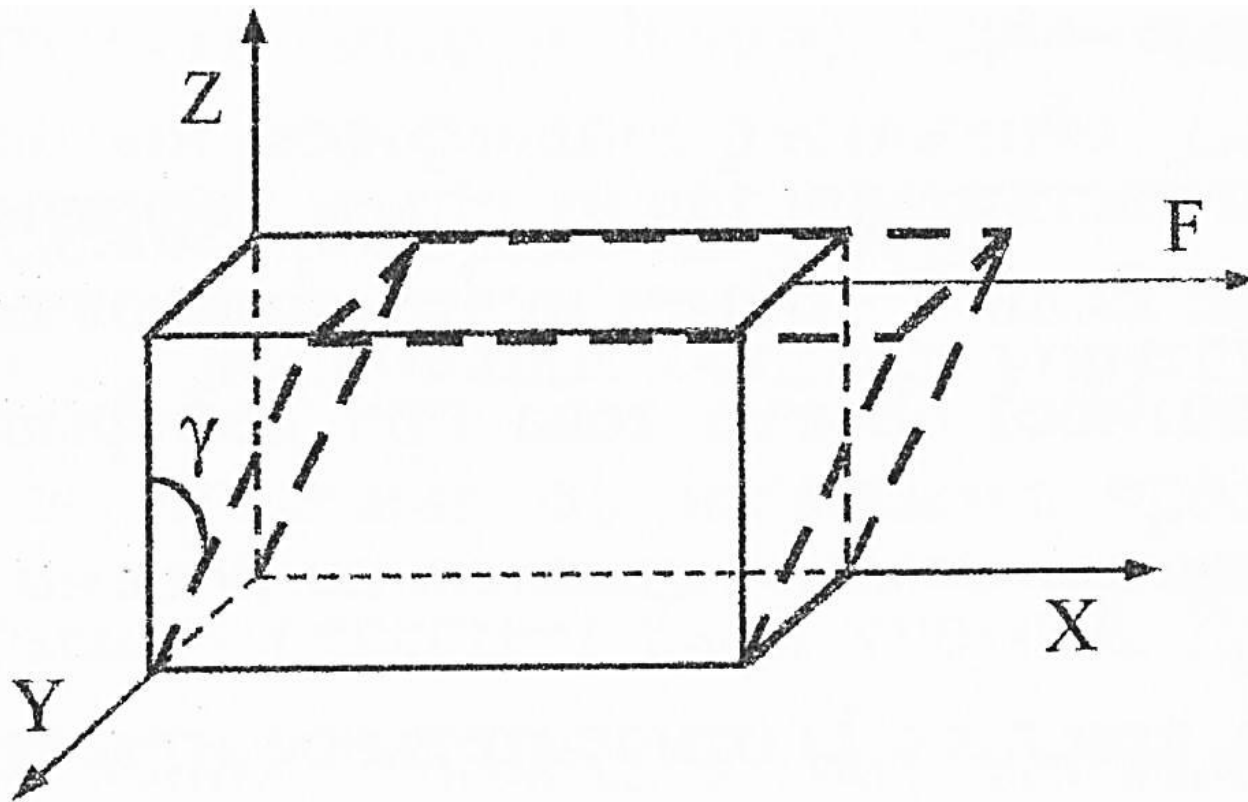
$\vec{F}_{\text{вн}}$ – внутренние силы

S – площадь поперечного сечения

Если внутренние силы направлены перпендикулярно к плоскости сечения –
нормальное напряжение.

Если направление внутренних сил и напряжения лежит в плоскости сечения –
касательное напряжение (τ).

Деформация прямоугольного параллелепипеда



γ – относительный сдвиг
 \vec{F} – деформирующая сила

Основными количественными характеристиками течения неньютоновских жидкостей являются:

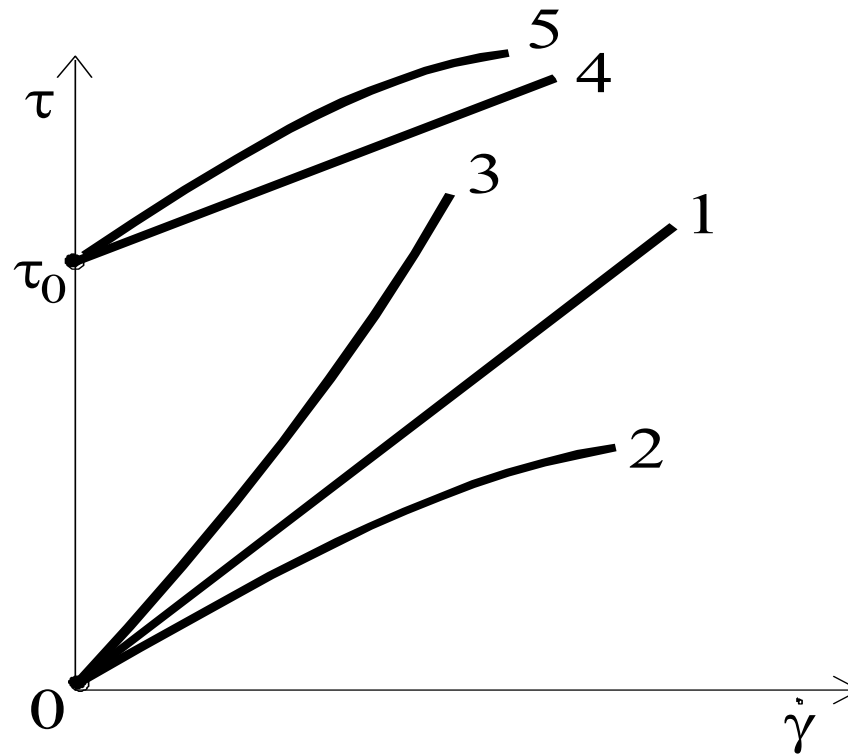
- Напряжение сдвига
- Скорость сдвига ($\dot{\gamma}$) – это величина, которая в гидродинамике называется модулем градиента скорости.

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dz}$$

Сила вязкого трения для ньютоновских жидкостей

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

Виды зависимостей τ от $\dot{\gamma}$



Линия 1 – ньютоновские жидкости

Линия 2 – псевдопластические жидкости

Линия 3 – дилатантные жидкости

Линии 4, 5 – вязко-пластические жидкости

Величина τ_0 - предельное напряжение сдвига

ПОВЕДЕНИЕ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ СДВИГА ОПИСЫВАЮТ ДВЕ МОДЕЛИ

Шведова-Бингама

- $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}$
при $\tau > \tau_0$
 k – некоторый коэффициент, совпадающий по размерности с коэффициентом вязкости

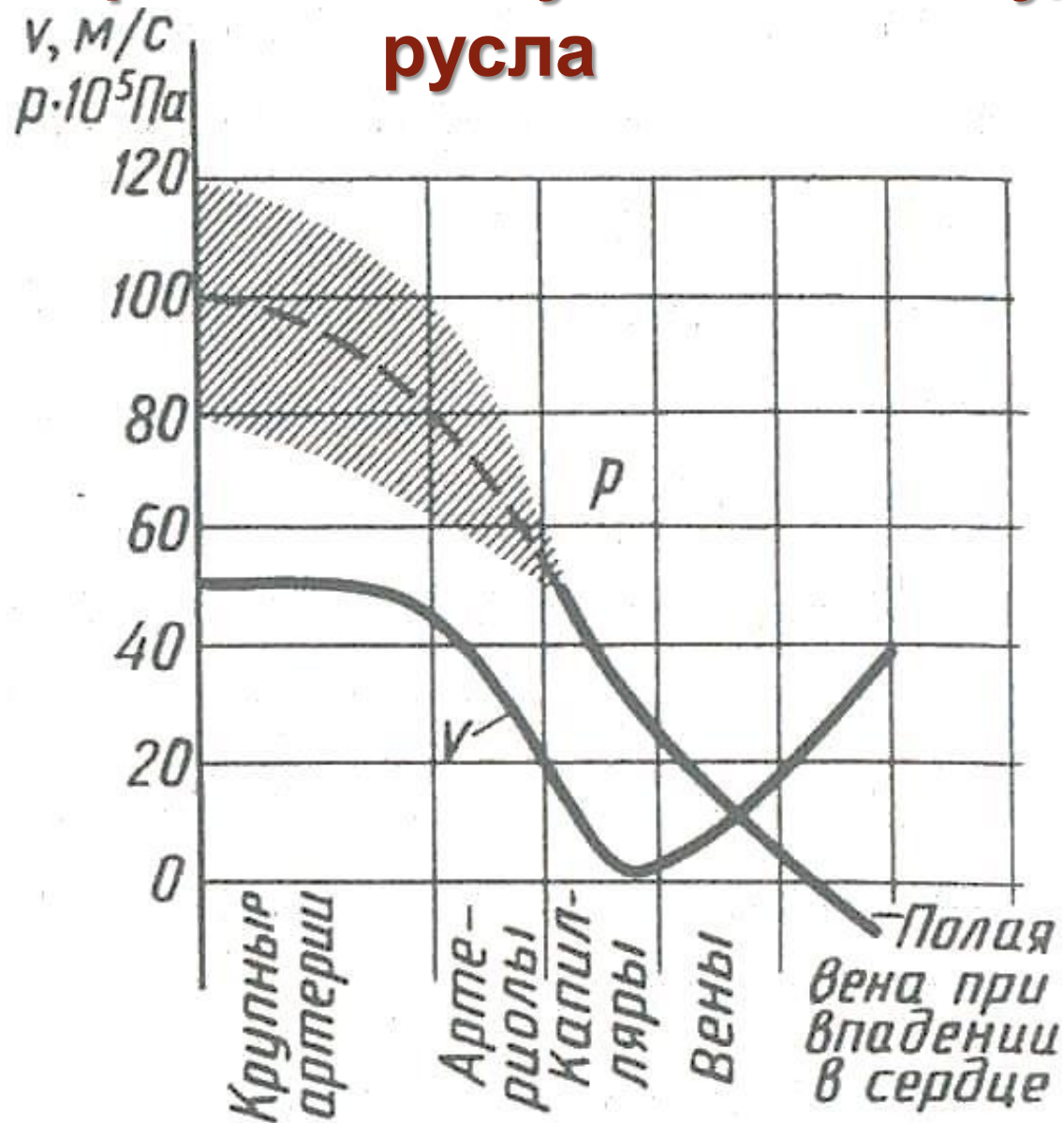
Кессона

- $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + k\sqrt{\dot{\gamma}}$
при $\tau > \tau_0$
 k – некоторый коэффициент, совпадающий по размерности с коэффициентом Кессона

Изменения средней линейной скорости течения крови в системе кровообращения человека

Сосуд	Площадь сечения, см ²	Общ. число	Длина, м	Ср.ск-ть течения, м/с	Ср. ск-ть сдвига, с ⁻¹	Ср. знач. числа Рейнольдса
Аорта	2,0...8,0	1	0,8	0,3...0,6	100	12...58·10 ²
Большие артерии	0,01...0,3	~10 ³	0,2...0,4	0,2	400	100...1000
Малые артерии, арт-лы	3·10 ⁻⁴ ...8·10 ⁻³	~10 ⁸	2...50·10 ⁻³	2...100·10 ⁻³	>10 ²	0,01...10
Капилляры	2·10 ⁻⁷ ...8·10 ⁻⁷	≥10 ⁹	10 ⁻⁴	5...7·10 ⁻⁴	400	1...3·10 ⁻³
Венулы, малые вены	3·10 ⁻⁴ ...0,03	~10 ⁹	2...10·10 ⁻³	1...10·10 ⁻³	~10 ²	0,01...1
Большие вены	0,2...0,8	~10 ³	0,1...0,3	0,1...0,2	100	100...600
Полые вены	~3	2	0,5	0,1...0,2	50	600...1000

Кривая распределения линейной скорости кровотока в различных участках сосудистого русла



Косвенный, бескровный способ измерения кровяного давления (по Короткову)

Показание манометра при первом появлении пульса соответствует максимальному, или *систолическому*, давлению (в норме оно приблизительно равно 16 кПа или 120 мм рт.ст).

Показание манометра в момент резкого ослабления последовательных тонов соответствует минимальному, или *диастолическому*, давлению (в норме оно равно 11 кПа или 80 мм рт.ст).

Работу, которую выполняет желудочек сердца по выталкиванию крови при одном сокращении

$$A = P \Delta V$$

P – среднее давление в желудочке при сокращении
 ΔV – изменение объема желудочка. При одном сокращении называется ударным объемом (V_y)

Кинетическая энергия крови

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho V_y v^2}{2}$$

Работа левого желудочка \longrightarrow Работа всего сердца

$$A_{\text{лж}} = V_y \left(P + \frac{\rho v^2}{2} \right) \longrightarrow A = 1,2 \cdot V_y \left(P + \frac{\rho v^2}{2} \right)$$

Пульсовая волна – это волна повышенного давления, которая распространяется по аорте и артериям.

Ее скорость 5...10 м/с.

За время изгнания крови из желудочков (время систолы $t_c = 0,3$ с) пульсовая волна успевает распространиться на расстояние

$$L = V_n \cdot t_c \approx 2 \text{ м}$$

С возрастом скорость пульсовой волны возрастает, вследствие уменьшения эластичности сосудов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

